



УДК 621.515

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ОБВОДОВ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО УСТРОЙСТВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ

THE INVESTIGATION OF THE CENTRIFUGAL COMPRESSOR INLET AND OUTLET DEVICE CONTOUR DESIGN IMPACT ON THE LOSSES

Винтер Михаил Юрьевич, магистрант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: mishavinter@mail.ru. Тел.: +7(950)638-17-99

Блинов Виталий Леонидович, канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vithomukyn@mail.ru. Тел.: +7(912)286-37-44

Комаров Олег Вячеславович, канд. техн. наук, доцент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ov_komarov@mail.ru. Тел.: +7(922)227-40-90

Mikhail Y. Vinter, Master student, Department «Turbiny i dvigateli», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: mishavinter@mail.ru. Ph.: +7(950)638-17-99

Vitaliy L. Blinov, Ph.D., senior lecturer, Department «Turbiny i dvigateli», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vithomukyn@mail.ru. Ph.: +7(912)286-37-44

Oleg V. Komarov, Ph.D., senior lecturer, Department «Turbiny i dvigateli», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ov_komarov@mail.ru. Ph.: +7(922)227-40-90

Аннотация: В работе проанализированы ряд вариантов исполнения обводов входного и выходного устройств центробежного компрессора, объединённых в группы по различным конструктивным признакам. Также оценивалось влияние формы обводов на величину потерь.

Abstract: The paper analyzes a row of centrifugal compressor inlet and outlet devices contour design combined in groups by several constructive feature. Also it estimates the contour design impact on the losses.

Ключевые слова: центробежный компрессор, вычислительная газодинамика, входное устройство, выходное устройство, радиальный обвод.

Key words: centrifugal compressor, CFD, inlet device, outlet device, radial contour.

ВВЕДЕНИЕ

Центробежные компрессоры (ЦБК) природного газа являются основной рабочей машиной компрессорных станций магистральных газопроводов отечественных газотранспортных предприятий. Важнейшими узлами компрессора являются входное и выходное устройства, на которые приходится значительная часть потерь энергии рабочего тела. Данная работа направлена на исследование влияния формы радиального обвода этих узлов на величину потерь.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для всех вариантов исполнения входной улитки (ВУ) на входе в домен были заданы статические

параметры в соответствии реальным условиям работы ЦБК на компрессорной станции: давление – 56,3 атм, температура – 288 К. В качестве граничных условий на выходе из домена был задан массовый расход газа. Расчёты производились по трём вариантам расхода: 200, 300 и 400 кг/с.

Минимальный размер ячейки сеточного разбиения расчётной области – 15 мм, максимальный – 20 мм. На поверхностях кольцевой части ВУ сетка уточнялась до размера ячейки в 7 мм. Таким образом, общее число ячеек составляло около 3 млн. Данное разбиение выбрано на основании исследования сеточной сходимости в одной из ранее опубликованных работ. [1]

В качестве рабочего тела был использован метан (CH₄RK) модели Aungier Redlich Kwong с уточнёнными критическими параметрами для природного газа согласно ГОСТ 23194 [2].

Оценка потерь производилась по следующим формулам:

$$\zeta_{\text{полн}} = \frac{P_{\text{вход}}^* - P_{\text{выход}}^*}{P_{\text{вход}}^*} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\zeta_{\text{стат}} = \frac{P_{\text{вход}} - P_{\text{выход}}}{P_{\text{вход}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{P_{\text{вход}}^* - P_{\text{выход}}^*}{0,5 \cdot c_{\text{вход}}^2 \cdot \rho_{\text{вход}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{вход}}^*$ – полное давление на входе в домен,
 $P_{\text{выход}}^*$ – полное давление на выходе из домена,
 $P_{\text{вход}}$ – статическое давление на входе,
 $P_{\text{выход}}$ – статическое давление на выходе,
 $c_{\text{вход}}$ – полное давление на входе в кольцевую часть ВУ,
 $\rho_{\text{вход}}$ – скорость потока на входе в кольцевую часть ВУ,
 $\rho_{\text{вход}}$ – плотность потока на входе в кольцевую часть ВУ,
 $\zeta_{\text{полн}}$ – потери полного давления,
 $\zeta_{\text{стат}}$ – потери статического давления,
 ζ – коэффициент потерь.

Ещё одним важным показателем для работы ЦБК является равномерность потока на входе в рабочее колесо (РК). Эта характеристика описывается интегральным коэффициентом неравномерности по формуле 4. Он позволяет количественно учесть особенности распределения скоростей по сечению без введения дополнительных коэффициентов [3]:

$$k_c = \frac{c_{\text{max}} - c_{\text{сред}}}{c_{\text{сред}}} \quad (4)$$

где c_{max} – максимальная скорость на выходе из домена,
 $c_{\text{сред}}$ – среднерасходная скорость на выходе из домена.

РАСЧЁТ ШТАТНОЙ ВУ

Для исследования был выбран ЦБК типа НЦ-16-76 как один из наиболее тиражируемых на российских газотранспортных предприятиях.

Модель тела тока была построена на основании чертёжной документации (рис. 1).

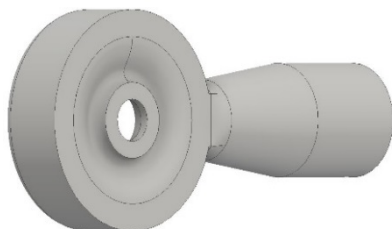


Рис. 1. Тело тока штатной конструкции ВУ

Кривые потерь в зависимости от расхода рабочего тела представлены на рис. 2.

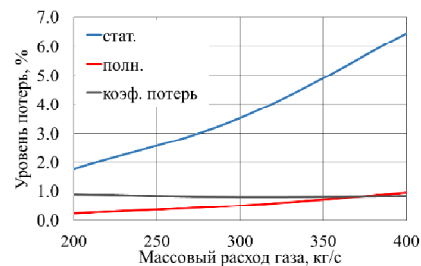


Рис. 2. Потери для штатной конструкции ВУ

Также для оценки равномерности потока на выходе из ВУ выносились картины распределения скорости (рис. 3).

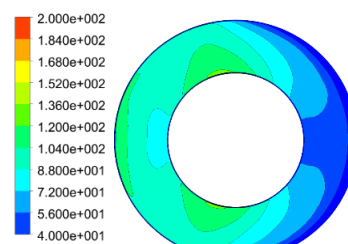


Рис. 3. Картина распределения скорости по выходному сечению ВУ

ВАРИАНТНЫЕ РАСЧЁТЫ ПО ГРУППАМ

Варианты 2-4 были построены на основании исследований В.К. Юна. [4] Выбраны заведомо лучший и один из худших вариантов для проверки правильности постановки задачи. Сравнение кольцевых частей представлено на рисунке 4.

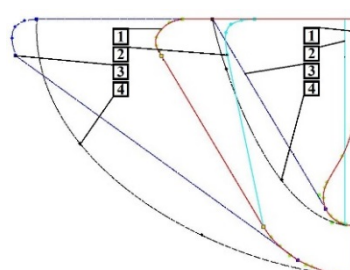


Рис. 4. Поперечные сечения вариантов 2-4

Вар. 2 имеет плоскую переднюю стенку, заднюю стенку с небольшим наклоном. В целом, проточная часть значительно уже штатной. Данный вариант был одним из худших в исследовании В.К. Юна. Проточная часть вар. 3 сильно уведена назад. Таким образом, поток для перехода из патрубка на РК совершает более плавный поворот с меньшим углом, чем в штатном варианте. Конструкция не вписывается в требуемые ограничения. В исследовании Юна данная проточная часть показала наименьший уровень потерь. Проточная часть вар. 4 похожа на предыдущую, но имеет более плавный канал для поворота потока. Также не вписывается в габаритные ограничения.

Окончательно по величине потерь варианты 2 и 4 превысили величину потерь штатного ВУ.

Группа вариантов 5-7 (рис. 5) и все последующие уже вписываются в стандартные ограничения по патрубку.

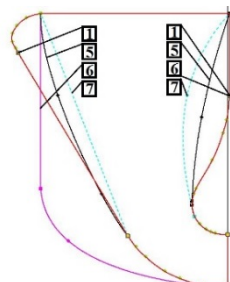


Рис. 5. Поперечные сечения вариантов 5-7

В вар. 5 была предпринята попытка «обрезать» передний и задний выступы на поперечном сечении штатной ВУ для оценки их общего участия в течении потока.

В вар. 6 без модификации передней стенки ВУ организован прямоугольный поворот потока. В вар. 7 смоделирован плавный переход на РК по передней стенке и прямолинейный – по задней. В данной постановке все исследованные варианты оказались хуже штатной ВУ.

Группа вариантов 10-11 построена на основании вар. 5 для определения влияния как переднего, так и заднего выступа на потери (рис. 6).

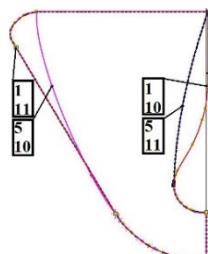


Рис. 6. Поперечные сечения вариантов 10-11

В вар. 10 отсечена задняя часть так, что задняя стенка является продолжением патрубка, а в вар. 11 – передняя.

Из картины потерь видно, что при отсечении задней части потери сильно растут. При отсечении передней рост потерь не так велик. Таким образом, задняя часть вносит больший вклад в течение потока в данном узле ЦБК.

Варианты данной группы полностью соответствуют стандартным ограничениям, кроме вар. 12. Вар. 8-11 подверглись модификации радиального обвода (рис. 7).

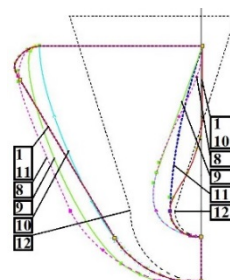


Рис. 7. Поперечные сечения вариантов 8-12

В вар. 8 организованы сглаживание заднего выступа ВУ и увеличение осевого участка течения потока. Вар. 9 основан на предыдущем, но имеет более прямолинейные контуры. Вар. 12 полностью рассчитан согласно методике Л.К. Чернявского. [5]

Обеспечено равенство проходных площадей ВУ в 4-х сечениях. Не соответствует штатным ограничениям.

В результате из цельнокольцевых конструкций наименьшие потери (на 30% ниже штатных) показал вар. 9. Вар. 12 показал самый лучший результат из-за неизменности площадей сечений различных участков, но этот вариант был экспериментальным, он не соответствует штатным ограничениям по габаритам.

Рассмотренные в этом разделе варианты 12-16 (рис. 8) имеют непостоянный по центральному углу радиальный обвод. Острый вырез был рассчитан по методу Л.К. Чернявского (рис. 9, а) [5], а плавный построен на его основе, но с более гладкими линиями (рис. 9, б).

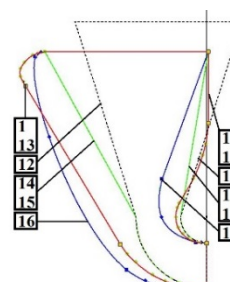


Рис. 8. Поперечные сечения вариантов 12-16

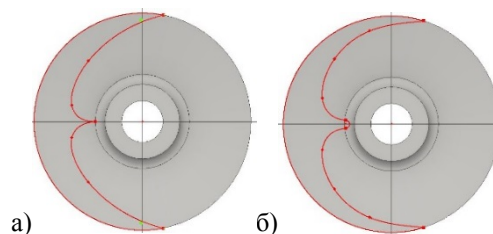


Рис. 9. Формы выреза кольцевой части ВУ (а – острый, б – плавный)

Вар. 13 представляет собой штатную ВУ с плавным вырезом. Кольцевая часть вар. 14 соответствует вар. 12, но дополнена уже штатным

патрубком. Вар. 15 по сравнению с предыдущим имеет плавный вырез. Кольцевая часть вар. 16 взята от вар. 9, который лучше всего себя показал при исследовании ВУ с кольцевым участком постоянного по центральному углу сечения. Выполнен плавный вырез.

Вар. 14-16 показали меньший уровень потерь из-за уменьшения влияния крупного вихря в кольцевой части по сравнению со штатной ВУ.

Подводя итог вариантным расчётам, приведём значения коэффициентов потерь по всем 16 вариантам исполнения ВУ (рис. 10).

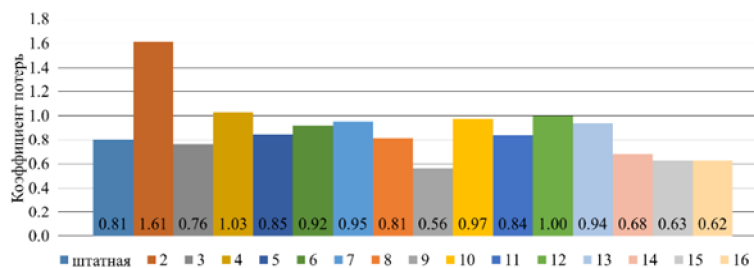


Рис. 10. Коэффициент потерь по вариантам ВУ

Из всех ВУ наименьший уровень потерь показал вар. 9. Потери полного давления были снижены на 29,4%, потери статического давления – на 28,3%, а коэффициент потерь – на 30,8%.

ВАРИАНТНЫЕ РАСЧЁТЫ СБОРНЫХ КАМЕР

Аналогичные исследования были начаты в отношении различных вариантов исполнения выходного устройства – сборной камеры. Цифрой 1 обозначен штатный вариант СК. Вар. 2 представляет собой модификацию штатной СК с уменьшающейся вплоть до центрального угла 180° площадью. Верхняя и нижняя половины относительно оси патрубка симметричны. Вар. 3 и 6 имеют прямоугольное сечение с плавными углами. Вар. 4 и 7 – расширяющееся к оси кольцевой части СК сечение. Вар. 5 и 8 – сужающееся сечение (рис. 11).

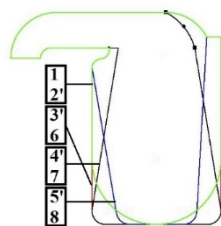


Рис. 11. Варианты поперечных сечений СК

Потери оценивались по формулам, аналогичным формулам для ВУ, приведённым ранее. Результаты проведённых на данный момент расчётов приведены на рис. 12.

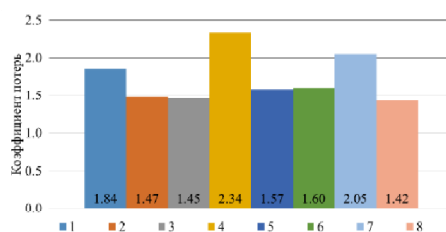


Рис. 12. Коэффициент потерь по вариантам СК

По результатам расчётов видно, что оптимизация данных узлов способна принести весомый вклад в снижение потерь в целом по ЦБК. Таким образом, появляется возможность увеличить общую эффективность агрегата. В дальнейшем полученные результаты следует уточнить при расчёте всей проточной части компрессора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винтер М.Ю., Бубнов А.Д., Блинов В.Л. Численное моделирование течения в выходном устройстве центробежного нагнетателя природного газа: Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной научной школы-конференции. В 2 т. Т. 2/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. – С. 110 – 113.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972. 720 с.
3. Мигай В.К., Гудков Э.И. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин - Л.: Машиностроение. Л., 1981.
4. Юн В.К. Основы совершенствования методов проектирования и унификации центробежных компрессоров различного назначения. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2012.
5. Чернявский Л.К. Профилирование сварных входных устройств центробежных компрессоров с радиальным подводом газа // Компрессорная техника и пневматика. №6, 2016. С. 19-22.